ETUDE DU RUISSELLEMENT ET DE L'INFILTRATION: LA TECHNIQUE DES PLUIES SIMULEES

A. CASENAVE

ORSTOM - B.P. 375 - Lomé

1.HISTORIQUE DES MESURES SOUS PLUIES SIMULEES

Les travaux menés actuellement sous pluies simulées sont l'aboutissement d'une évolution progressive des techniques d'étude de l'hydrodynamique des sols. Depuis fort longtemps, les hydrologues se heurtaient au problème de la quantification de l'aptitude au ruissellement des différents types de sols. Les renseignements tirés des cartes pédologiques s'avéraient souvent peu pertinents, la classification pédologique, fondée sur des critères morphogénétiques ne reflétant pas les caractéristiques hydrodynamiques des sols.

Pour tester de façon plus précise ces caractéristiques, on a longtemps utilisé l'infiltromètre à double anneau (MUNTZ) ou la méthode PORCHET qui ne permettaient d'obtenir, dans les meilleurs des cas, que des résultats de caractère qualitatif.

Par la suite, de nombreuses parcelles de ruissellement, d'érosion, de drainage oblique ou vertical ont été installées par les pédologues et les hydrologues de l'ORSTOM et du CIRAD sous diverses latitudes (Côte d'Ivoire, Burkina Faso, Niger, Togo, Bénin, Tchad, Tunisie, Guyane, Madagascar, etc...)

Il est ensuite apparu, qu'un progrès pouvait être réalisé en s'affranchissant des aléas des précipitations naturelles par la technique de simulation des pluies. Un premier appareil, dérivé du simulateur de type SWANSON, a été utilisé, de 1975 à 1980, par une équipe multidisciplinaire de l'ORSTOM, sur des sites échelonnés de la zone tropicale humide à la zone sahélienne (Côte d'Ivoire, Burkina Faso et Niger). La lourdeur de ce dispositif le rendait, toutefois, difficilement utilisable dans certaines régions (Difficultés d'accès ou de ravitaillement en eau).

En 1977, dans le cadre d'une étude des crues décennales des petits bassins versants de la zone forestière tropicale, est utilisé , pour la première fois, le mini-simulateur mis au point par ASSELINE et VALENTIN, pour tester les caractéristiques hydrodynamiques des différents sols forestiers. En 1981, une première utilisation du mini-simulateur, en zone sahélienne, à des fins hydrologiques, est tentée dans le cadre

de l'étude de la Mare d'Oursi au Burkina Faso. Parallèlement à ces études hydrologiques, les pédologues poursuivaient leurs travaux sur l'étude de la genèse et du comportement hydrodynamique des organisations pelliculaires superficielles.

2. INTERET DES ETUDES SOUS PLUIES SIMULEES

Les nombreuses études réalisées jusqu'à présent dans le domaine des relations eau-sol (bassins versants, parcelles d'érosion ou de ruissellement, bilans hydriques des sols, etc...) se heurtaient à:

- un problème *d'analyse des paramètres* qui exercent une influence sur l'infiltration et le ruissellement. Du fait de leur nombre et de leurs interactions, il est difficile, sous pluies naturelles, de mettre en évidence leur rôle respectif. Le simulateur de pluie, qui permet de fixer à volonté, les caractéristiques des averses, l'état d'humectation du sol par des arrosages successifs, de tester différents types de sols, d'états de surface, de couvertures végétales ou de pentes, autorise une analyse beaucoup plus fine des phénomènes.

- un problème *de durée des études*. Pour obtenir un résultat fiable sous pluies naturelles, il est nécessaire de prolonger les mesures sur plusieurs années, surtout en zone sahélienne où les pluies sont rares et irrégulières. Grace aux mesures sous pluies simulées, la durée des études a pu être réduite de façon très sensible pour un résultat d'une précision sensiblement égale, sinon supérieure dans certains domaines, à celle des mesures classiques.

- un problème *d'extension spatiale des résultats*. Du fait de leur durée, les mesures classiques ne sont effectuées que sur un petit nombre de sites. Les mesures sous pluies simulées, beaucoup plus rapides, permettent pour un même investissement de tester un nombre de sites bien plus élevé. De plus, les mesures sous pluies simulées ont révélé, qu'en zone soudano-sahélienne, seule la cartographie très détaillée des états de surface permet une extrapolation fiable des résultats acquis sur parcelles au niveau du petit bassin versant.

- un problème *d'expérimentation*. Les mesures d'infiltration ont, dans la plupart des cas, été réalisées à l'aide de techniques interdisant le ruissellement (Müntz,Pioger) qui détruisent ou modifient les croûtes superficielles et sont donc très éloignées de la réalité physique des phénomènes. Les études sous pluies simulées ont montré que, dans le cas général, les valeurs d'intensité d'infiltration ne peuvent être déduites de tests infiltrométriques de type Müntz; en effet, non seulement les valeurs ne sont pas du même ordre de grandeur, mais elles ne correspondent même pas à un classement identique, les réactions de la

surface du sol à l'impact des gouttes de pluie n'étant pas les mêmes que pour l'apport d'une épaisse lame d'eau.

3. LIMITES DES MESURES SOUS PLUIES SIMULEES

- La première de ces limites résulte d'une contrainte technologique. Le simulateur de pluie, dans sa version actuelle, ne peut produire des intensités inférieures à 20 $mm.h^{-1}$. Si pour les études "d'érosion" ou les études hydrologiques axées, avant tout, sur la détermination des fortes crues, cette limite n'est pas très génante, cette érosion ou ces crues résultant, généralement, d'épisodes pluvieux intenses, il n'en est pas de même pour d'autres études. Lorsque l'on s'attache à déterminer le bilan hydrique d'un sol, il est nécessaire de reproduire des averses les plus semblables possible aux averses naturelles; or la plupart de celles -çi ont des intensités inférieures à 20 $mm.h^{-1}$.Il est donc difficile, dans ce cas d'utiliser le simulateur de pluie, sauf extrapolation vers les faibles intensités des résultats des pluies simulées. Cette extrapolation n'est pas sans risque, les réactions d'un sol ou d'un état de surface n'étant pas les mêmes sous une faible ou une forte intensité.

- La seconde limitation de la technique des pluies simulées provient de la taille réduite de la parcelle qui ne permet pas d'accéder à certaines variables influençant le ruissellement, l'infiltration ou l'érosion. La principale de ces variables non prises en compte est la pente, dont les mesures effectuées sous pluies simulées ont montré qu'elle n'avait aucune influence à cette échelle.

- La taille réduite de la parcelle est également à l'origine de la principale limite de la technique des pluies simulées à savoir ce que l'on regroupe généralement sous le terme "d'effet d'échelle". Du fait de la variabilité spatiale des paramètres mesurés, de l'intervention dans les fonctions de transfert de variables non quantifiées à l'échelle du m^2 - pente, position topographique, macrorelief,...- l'extension de mesures quasi-ponctuelles à l'échelle d'un bassin versant de plusieurs Km^2, n'est pas des plus évidente.

4. PROTOCOLES DES PLUIES SIMULEES

Il n'est, bien sûr, pas possible de définir un protocole standard, valable pour toutes les études utilisant la technique des pluies simulées. Le protocole doit être adapté aux différents problèmes étudiés. Nous nous contenterons donc de donner quelques exemples de protocoles réellement utilisés.

4.1. Etudes Hydrologiques.

On considère généralement que les principaux facteurs influençant le ruissellement, outre la nature de l'averse que l'on peut caractériser par son intensité et sa durée sont: le

type de sol ou les états de surface en zone sahélienne, l'état d'humectation initial du sol, la pente (dont nous avons déja dit qu'elle ne peut être prise en compte sous pluie simulée), la couverture végétale et l'activité faunique (qui sont englobées dans l'état de surface). Le dispositif expérimental et le protocole des mesures doivent permettre de caractériser, avec le minimum de pluies, le rôle de chacun des facteurs susceptibles d'influencer le ruissellement.

4.1.1. Forme des pluies.

Afin d'approcher au plus près les phénomènes naturels, nous nous sommes imposé un certain nombre de contraintes dans la définition des protocoles, quant à la forme et au nombre des pluies:

- averse à pointe d'intensité unique,
- taille de la pluie ne dépassant pas la hauteur de la pluie journalière de fréquence annuelle ou décennale. Ces hauteurs sont déterminées au poste pluviométrique de longue durée le plus proche du site des mesures,
- total des pluies sur une parcelle n'excédant pas la valeur moyenne de la pluviométrie annuelle,
- composantes intensité-durée-fréquence respectant celles communément admises pour la région.

4.1.2. Protocole

Pour tester une parcelle qui correspond soit à une surface élémentaire, soit à un type de sol, le protocole est fondé sur une succession de pluies simulées "annuelles" et "décennales". Chaque averse est constituée d'une série de 4 à 7 intensités différentes (ce qui permet d'étudier les variations de l'intensité du ruissellement en fonction des intensités de pluie). Chaque percelle est soumise à une succession d'averses (généralement 6) séparées par des temps de ressuyage variables, afin d'étudier l'influence de l'état d'humectation initial du sol.

Tableau 1: Exemple de protocole de simulation de pluie sur une parcelle du bassin de Banigorou (Niger)

Pluie (mm)	Temps de ressuyage (heures)
115	
	24
55	
	72
55	
	24
55	
	84
55	
	24
115	

4.1.3. Dispositif expérimental

Lors des mesures sous pluies simulées, chaque parcelle permet de tester le comportement d'un type de sol ou d'une surface élémentaire en zone sahélienne. Un site expérimental regroupe plusieurs parcelles (entre 3 et 5) et permet donc de tester un état de surface (constitué de plusieurs surfaces élémentaires) ou la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques du sol.

4.2. Etude de l'influence de l'état de surface

Pour étudier l'influence de l'état de surface sur le ruissellement, VALENTIN a utilisé, dans le cadre du programme HYPERBAV, le dispositif suivant. Une parcelle a été implantée à demeure pendant toute la durée du programme. Tous les mois, après avoir simulé une pluie destinée uniquement à ramener le sol au même état d'humectation, une pluie standard était appliquée sur cette parcelle. La comparaison des résultats de ces pluies standard mensuelles permet de faire ressortir l'influence de l'état de surface (végétation et activité faunique) qui est la seule variable évoluant au cours du temps sur cette parcelle.

4.3. Etude de la variabilité spatiale du ruissellement

Dans le cadre du programme HYPERBAV, IRIS a étudié la variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques des sols. Sur un hectare considéré comme homogène, à partir de la cartographie pédologique de FRITSCH, 30 parcelles ont été implantées. La surface de ces parcelles a été recouverte par un mulch afin d'éliminer le facteur état de surface. Une pluie standard (60 mm à 120 mm h^{-1}) a été simulée sur l'ensemble de ces parcelles. Les résultats de ces pluies mettent en évidence une variabilité non négligeable (CV=30%) du ruissellement.

5. LES ETATS DE SURFACE

5.1. Définitions (CASENAVE et VALENTIN,1988)

5.1.1. Surface élémentaire

le terme "surface élémentaire" désigne, à un instant donné, un ensemble homogène constitué par les éléments du milieu suivants:

- le couvert végétal,
- la surface du sol,
- les organisations pédologiques superficielles qui ont subi des transformations, sous l'effet des facteurs météorologiques, fauniques ou anthropiques.

5.1.2. Etat de surface

Le terme "état de surface" peut désigner:
- une seule surface élémentaire,
- la juxtaposition de plusieurs,
- ou un système de surfaces élémentaires, c'est à dire un ensemble, au sein duquel jouent des interactions.

5.2. Influence des états de surface.

De nombreux travaux, à la suite de ceux de DULEY (1939), ont mis en évidence le rôle joué par les caractéristiques physiques des premiers cm du sol. Toutefois, la plupart de ces données ont été obtenues au laboratoire, sur des échantillons remaniés. Bien que de nombreux chercheurs aient entrepris l'analyse des organisations superficielles en zone aride et semi-aride, ces analyses n'étaient pas combinées à des mesures expérimentales de comportement. Il a fallu attendre la fin des années 70, et les premiers résultats des mesures sous pluies simulées pour faire ressortir l'influence primordiale des organisations superficielles sur l'hydrodynamique des sols (COLLINET et LAFFORGUE, 1979; COLLINET et VALENTIN, 1979; VALENTIN, 1981).

Depuis, l'analyse statistique des données obtenues, d'abord sur 48 parcelles (ALBERGEL et al., 1986), puis sur 141 soumises à 860 averses simulées (ALBERGEL et al., à paraître), a permis de mettre en évidence les facteurs conditionnels de l'infiltration et du ruissellement sur une vaste zone géographique et de hiérarchiser l'influence de ces différents facteurs (VALENTIN, 1986). Il est ainsi apparu que pour la zone aride et semi-aride, 3 variables caractéristiques du milieu (couvert végétal, activité faunique et croûtes) suffisent à expliquer significativement (R^2=0,84 pour 87 parcelles) le coefficient d'infiltration.

De trop nombreux exemples montrent cependant que l'utilisation aveugle de telles formules statistiques n'est pas exempte de dangers et qu'une approche plus naturaliste, de type système expert, peut constituer un "garde fou" précieux, en fournissant un mode d'emploi de ces régressions. C'est pourquoi CASENAVE et VALENTIN (1988) ont proposé une typologie des surfaces élémentaires, qui essaye de concilier les deux approches; statistique et naturaliste. Cette typologie est fondée sur une base expérimentale et des traitements statistiques, mais ces résultats sont pondérés par des critères d'ordre morphologique.

5.3. La typologie des surfaces élémentaires.

Cette typologie repose sur un certain nombre de critères caractéristiques du milieu, dont l'analyse statistique a montré qu'ils influençaient de manière notable l'infiltrabilité. Ces principaux critères sont les suivants:

5.3.1.Le type de croûte

A partir de l'étude des processus et des facteurs de formation des croûtes superficielles, CASENAVE et VALENTIN (1988) proposent une typologie morpho-génétique des principales croûtes sahéliennes, basée sur le nombre de microhorizons et sur la structure du microhorizon affleurant. Cette typologie, synthétisée dans la figure 1, permet de distinguer 9 types principaux dont la désignation fait référence à leurs mécanismes de formation.

5.3.2.Le couvert herbacé ou cultural.

C'est ce couvert qui assure la protection du sol contre les "agressions" extérieures (pluie, vent...) qui sont les principaux facteurs des réorganisations superficielles.

5.3.3.L'activité mésofaunique.

Elle a une influence directe sur l'infiltration par la porosité qu'elle génère.

5.3.4.Le microrelief.

Ce sont les petits accidents du terrain (amplitude comprise entre 5 et 50 cm) qui confèrent au sol la rugosité susceptible de diminuer le ruissellement et d'augmenter le stockage superficiel de l'eau.

5.3.5.La porosité vésiculaire.

Ces vésicules sont un indice précieux de conditions peu favorables à l'infiltration. Elles se forment, en effet, lorsque l'air du sol ne peut s'échapper dans aucune direction, du fait d'une forte imperméabilité du milieu.

5.3.6.La texture du sol.

Elle n'intervient dans la typologie qu'en tant qu'élément secondaire. En zone sahélienne, seules les textures très sableuse (taux de sable >90%) et argileuse (taux d'argile >40%) ont une influence sur l'infiltration.

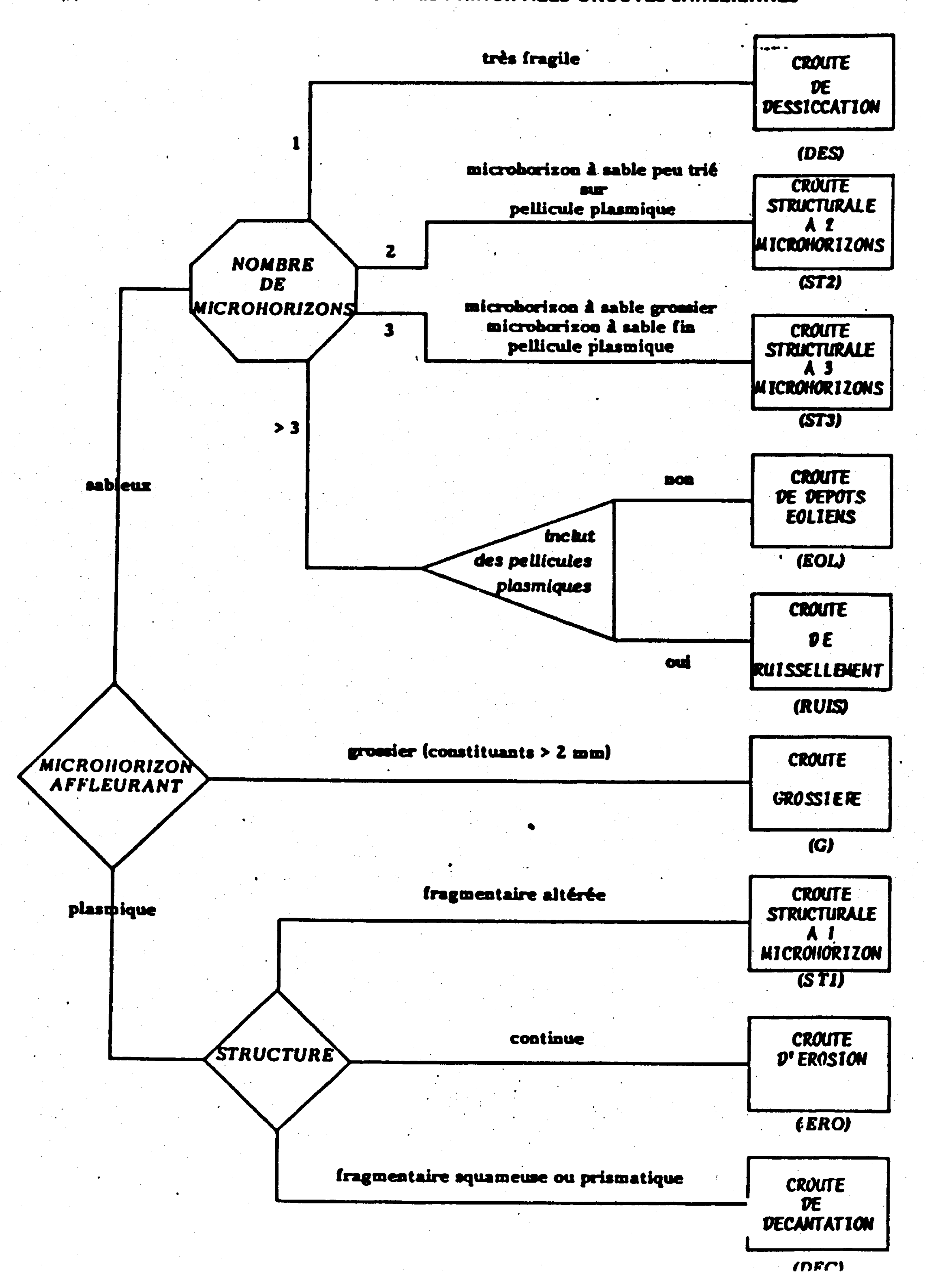
5.4.Les grands types de surfaces élémentaires.

A partir des critères d'identification précédents, on peut classer toutes les surfaces élémentaires en 11 grands types. La clef de détermination en est donné dans la figure 2.

Chaque type de surface élémentaire correspond à un fonctionnement hydrologique particulier qui est caractérisé par une équation du ruissellement et les fourchettes des valeurs que peuvent prendre certaines variables de l'infiltration.

Afin de représenter au mieux, toute la diversité possible des situations, nous avons été amenés à définir, dans certains types de surface, des variantes en fonction

FIG. 1 : CLEF DE DETERMINATION DES PRINCIPALES CROUTES SAHELIENNES



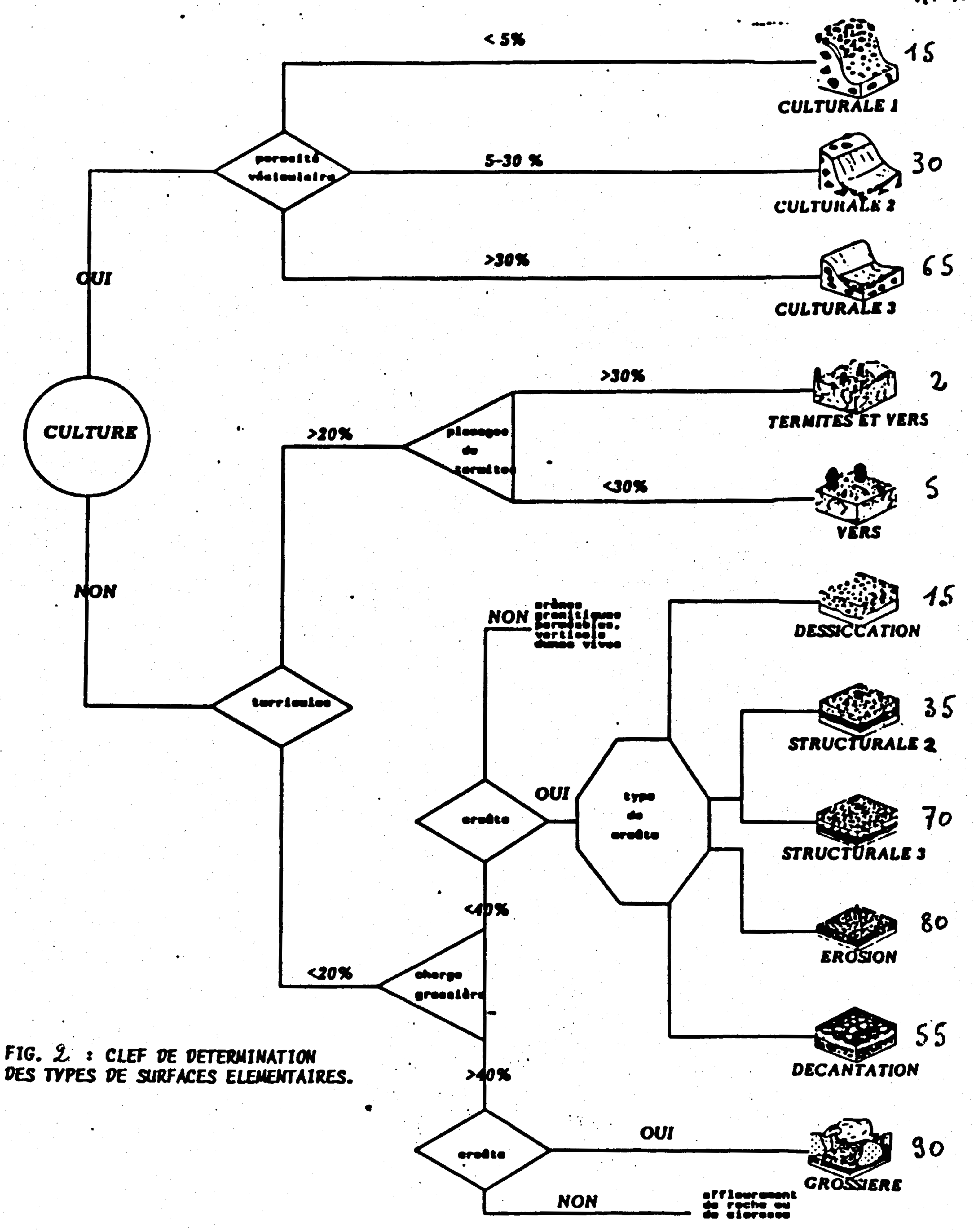


FIG. 2 : CLEF DE DETERMINATION DES TYPES DE SURFACES ELEMENTAIRES.

d'éléments "modulateurs" qui s'ajoutent aux critères principaux d'identification. Ces éléments ne changent pas la définition du type de surface, mais ont une influence sur les valeurs de l'infiltration.

5.5. Le concept d'état de surface.

S'il est possible, à l'échelle de la parcelle, de décomposer la surface du sol en un nombre limité de fractions hydrologiquement homogènes, il n'en est pas de même à l'échelle directement supérieure, celle du petit bassin versant. A cette échelle, le nombre trop élevé de combinaisons possibles entre les surfaces élémentaires impose, pour caractériser le milieu, un nouveau concept: celui d'"état de surface" qui a été défini au paragraphe 5.1.

Ce concept d'état de surface a été utilisé pour définir un nouveau mode de représentation cartographique du milieu où ne sont prises en compte que les variables conditionnant l'infiltration et le ruissellement (VALENTIN, 1986). Les unités cartographiques définies dans cette méthode correspondent à des états de surface, c'est à dire à une ou, le plus souvent, à la combinaison de plusieurs surfaces élémentaires.

A chaque surface élémentaire correspond une équation donnant la lame ruisselée en fonction de la pluie et de l'état d'humectation du sol. En combinant ces équations au prorata du pourcentage occupé par chacune des surfaces élémentaires, on obtient la fonction de production du ruissellement des unités cartographiques puis, de l'ensemble du bassin.

Cette cartographie des états de surface s'est avérée, de plus, extensible et transposable à partir d'images satellitaires (CHEVALLIER, 1986; ALBERGEL, 1988). Ces études faites au Burkina Faso, ont montré, qu'en zone sahélienne, la conjugaison des études sous pluies simulées, de la télédétection et d'une modélisation à petits pas de temps, constitue un outil performant pour la simulation des écoulements, la prédétermination des crues de fréquence rare et la transposition des résultats à un bassin non observé.

6 CONCLUSIONS

La simulation de pluies a mis en relief le rôle prépondérant, sur l'infiltrabilité, des paramètres caractéristiques de l'état de surface.

Elle est à la base d'une méthode cartographique originale des états de surface qui répondent à des critères d'homogénéité tant au niveau de leur dynamique évolutive qu'à celui de leur fonctionnement hydrologique.

En zone sahélienne, le nombre relativement réduit d'états de surface permet un diagnostic du fonctionnement hydrologique actuel. En outre, l'existence de relations génétiques entre les surfaces élémentaires doit faciliter un pronostic à plus long terme.

Toutefois, les succès encourageants obtenus dans cette zone ne sauraient cacher les difficultés à appliquer ce type d'approche à d'autres milieux naturels comme la zone foresa

tière où les fonctions de production du ruissellement sont conditionnées par les organisations internes de la couverture pédologique, ou la savane humide dont les états de surface sont sujets à des variations saisonnières importantes.

La capacité d'infiltration d'un sol ferrallitique au Rwanda: comparaison des résultats obtenues par un perméamètre annulaire, un oedomètre, et deux types de simulateurs de pluie.

J. MOEYERSONS

La conductivité hydraulique montre des écarts considérables selon l'appareillage utilisé. Dans le cas du Rwanda (colline de Rwaza, ferralsol), $k_{(perméamètre)}$ est de l'ordre de 10^{-3} cm/s, tandis que $k_{(oedomètre)}$ varie entre 10^{-4} et 10^{-6} cm/s. La plus grande infiltration, mesurée à l'aide du perméamètre résulte vraisemblablement de l'effet de la succion, effet qui ne joue pas dans le cas de l'oedomètre. On aurait donc tendance à considérer les valeurs $k_{(perméamètre)}$ comme plus réalistes.

Mais sur le terrain on peut observer le déclenchement du ruissellement à partir des intensités de pluie beaucoup plus basses que l'équivalent de la valeur $k_{(perméamètre)}$. L'établissement d'envelopes d'infiltration à l'aide d'un simulateur de pluie semble être l'approximation la plus réaliste de ce qui se passe sur le terrain. La méthode permet une évaluation, du moins relative, de la capacité de production de ruissellement d'une surface donnée. Des essais de simulation de pluie verticale et oblique y seront décrits.

Pluies artificielles et verticales sur les sols ferrallitiques du Rwanda: la détermination d'enveloppes d'infiltration

J. MOEYERSONS

Musée royal de l'Afrique Centrale, B-1980 Tervuren, Belgique.

Résumé: Les sols ferrallitiques au Rwanda ont une capacité prononcée de production de ruissellement. La conductivité hydraulique de ces sols, argileux en profondeur, varie selon leur degré de saturation en eau de 400 mm/h à 0,036 mm/h. Sur le terrain le ruissellement se manifeste à partir des intensités de pluie de 10 à 30 mm/h.

Les enveloppes d'infiltration, déterminées sur le terrain sous la condition de pluies artificielles verticales confirment l'observation empirique que le labour freine pendant quelque temps le développement du ruissellement.

Les expériences à l'aide d'un simulateur à pluie oblique montrent que la pente du terrain et l'angle d'incidence des gouttes de pluie influencent la capacité de production de ruissellement d'un micro-interfluve. Les conditions les plus favorables au développement du ruissellement sont une pente raide et/ou un angle d'incidence des gouttes de pluie proche de 90°.